

1 引言

截止 2008 年底,全世界各种计算机系统(包括通用的台式机系统、专用的嵌入式计算机系统和大型的服务器系统)的保有量超过了 30 亿台,且数量继续呈快速增长的势头.如果按 1 度(千瓦时)电收费 0.5 元人民币计算的话,全球计算机用户一年要交纳的电费约为 5000 亿元人民币.

目前计算机系统的广泛使用除消耗大量的电力能源外(占到全部电力消耗的 12%),由于计算机系统不但同 Internet 网络相连,而且同电力网络紧密相连,其运行产生了严重的环境影响(如图 1 所示),包括大气质量恶化、建筑资源消耗、维护成本巨大、人力资源浪费、回收再利用成本高等.

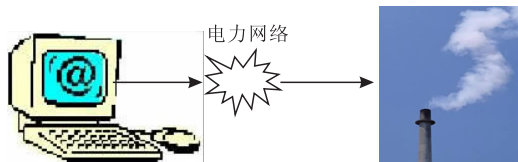


图 1 计算机系统广泛使用产生的一些负面环境影响

可见,计算机系统从 1946 年开始,经过 60 多年的快速发展和全球广泛应用,对人类社会进步产生了巨大的推动作用,其对环境的一些负面影响也日益显现出来.“节能减排、科学发展、人人参与”,不单是钢铁、化工、制造等高能耗重型行业必须完成的任务,也是 IT 和计算机领域必须面对的紧迫问题.

因此,协调 IT 技术与产品和环境的关系,实施“绿色计算”是这些问题最有效的解决方案.绿色计算强调,利用各种软/硬件先进技术,将目前大量计算机系统的工作负载降低,提高其运算效率(如 flop/watt 指标),使计算机系统的数量减少,进一步降低系统配套电源能耗,同时,改善计算机系统的设计,提高其资源利用率和回收率,降低二氧化碳/温室气体排放,从而达到节能、环保和节约的目的.

2 绿色计算的发展与现状

绿色计算是在追求计算机系统性能快速发展的前提下,不断改善环境、持续提高生活质量的背景下产生的.其大的背景可追溯到 1987 年联合国的报告《我们共同的未来》,在该报告中提出了“可持续发展”的基本概念,其基本思想立即得到广大环境保护者、经济学者和社会活动家的承认.

2.1 工业界的发展与现状

在 IT 领域,第一个表现绿色计算的“能源之星(Energy Star)”计划起源于 1992 年.能源之星服务作为一种自愿性标签,批给电脑产品,在尽量减少使用能源的同时,最大限度地提升能源的使用效率.能源之星的应用产品,包括电脑显示器、电视机和温度控制设备(如冰箱、冷气机)等^①.绿色计算的第一批成果之一是电脑显示器的睡眠模式功能,在预先设定的时间内,用户的活动未被检出时,显示器设备将处于待机模式.

计算机系统节能,当然要从 CPU(Central Processing Unit,中央处理器)开始.传统台式机的 CPU 因为在同一个芯片中制作了大量的晶体管,由十亿个晶体管构成的芯片通常会额外泄漏 60~70 瓦电力,并且运行在极高的频率上,其结果是 CPU 芯片消耗的电力和产生的热量日益增多,不仅增加了系统的能耗,而且往往因为散热问题给系统设计带来麻烦.因此,许多 CPU 厂商在版图级、电路级、门级、RTL 级、微结构级等多个级别采取功耗优化设计措施,纷纷推出了低功耗的 CPU 产品,如基于 ARM 核的系列嵌入式 CPU、威盛公司的 Eden-N 处理器和 AMD 公司的 Opteron 处理器,这些产品的目标均是在追求高性能的同时力争减少能耗.

目前,多核(MultiCore)、众核(ManyCore)技术是进一步提高处理器计算能力的主要手段,如 IBM 公司的 POWER 6 处理器,Intel 公司的 Xeon 处理器和中国科学院计算技术研究所的 Godson-T 处理器,普遍采用了多线程、片上互联与通信、高性能 Cache 与总线接口、低功耗设计等新的结构与技术,由于功耗问题更为突出,追求高能效比(Power efficiency)是这些处理器设计的一个重要指标.

同时,许多计算机系统外设和通信厂商也积极将绿色计算理念用于产品设计中,如 Avocent 公司、APC 公司、Seagate 公司等外设厂家和华为、中兴、诺基亚等通信设备厂商提出的绿色通信解决方案.

此外,一些业内知名的 IT 企业也积极联合起来,成立了关于绿色计算的企业联盟,主要包括:

(1) Green Grid(绿色网格)组织.由 AMD、APC、Dell、HP、IBM、Intel、Microsoft、Rackable Systems、SprayCool、Sun Microsystems 和 VMware 等公司成立的全球性企业联盟,致力于发展和改善数据中

① EPA Energy Star. <http://www.energystar.gov>, 2008

心和信息设备的能源使用效率^①。

(2) Climate Savers Computing Initiative(CSCI; 电脑产业拯救气候行动计划). 由 Intel、Google、AMD、eBay、Lenovo 等公司成立,目标是超越“能源之星”计划的相关要求,达到更具进取性的节能标准,到 2010 年减少计算机系统 50% 的能耗,力争实现将电脑操作而导致的全球二氧化碳排放量减少 5400 万吨/年,相当于 1100 万辆汽车或 10~20 座火电厂的年排放量^②。

国际上,EPEAT(Electronic Product Environmental Assessment Tool,电子产品环境评价工具)是开发绿色计算相关标准的机构之一。EPEAT 采用铜、银、金 3 个等级对计算机以及其它电子设备的环保表现进行综合评价,一个产品必须满足所有的必备指标才可通过 EPEAT 认证,制造商通过可选指标来提升产品的 EPEAT 认证等级^③。

当前,一些计算机制造商发布了一些有关产品功耗的数字,这些数字由于工作量、系统配置、测试环境等差异而很难具有可比性。为解决功耗测试基准问题,以下两个测试基准应运而生:

(1) EECoMark 工具, Windows 基准测试组织 BAPCo 与标准化组织 ECMA(European Computer Manufacturer Association, 欧洲计算机制造商协会)联合宣布了二者共同开发的新款基准测试工具 EECoMark,以节能效率为前提衡量个人电脑的性能水平,Intel 公司也参与了 EECoMark 的制定工作^④。

(2) SPECpower_ssj2008 测试标准。著名的 SPEC(Standard Performance Evaluation Corporation, 标准性能评价公司)于 2007 年 12 月发布了 SPECpower_ssj2008 测试标准,提供了一种测量功耗(交流输入)的方式,该标准既可以作为一个测试基准,用于比较不同服务器的功耗和性能,也可以作为一个工具集,用于改善服务器的能效,有助于 IT 管理员了解功耗特性,提高数据中心机房的效率^⑤。

随着绿色计算构想的不断发展,绿色计算技术不仅关注计算机系统功耗问题,而且开始涵盖瘦客户机(Networked Computer,NC)解决方案、能源成本核算、虚拟化方法、eWaste 等内容。绿色计算促使 IT 企业在进行生产经营时,不但要考虑自身的运营成本,更要考虑到其技术产品在应用中所产生的社会成本、环境成本;不但要考虑到市场和利润,更要考虑到社会价值和环境影响。随着越来越多厂商的关注,使绿色计算普及并不断创新,严重影响着业界

IT 趋势的发展。对 IT 用户来说,日常的工作和生活也会处于一个绿色环境之中。

2.2 学术界的发展与现状

自从 1946 年第一台电子计算机诞生以来,旨在降低计算机系统功耗的研究就没有停止过。在计算机系统中,可移动的嵌入式系统的功耗优化更为急迫。以无线传感器网络为例,由于无线传感器网络在军事、医疗健康、灾难拯救、智能家居、精细农业、环境监测、空间探测和可穿戴计算等领域的广泛应用前景,正受到世界许多国家学术界、工业界和军事部门的普遍重视,在有关无线传感器网络的诸多研究中,功耗问题都是一个重要的研究内容^[1]。

为推动和加速计算机系统功耗技术的研究与发展,DARPA(美国国防部高级研究计划署)于 1999 年启动 PAC/C(Power-Aware Computing and Communications, 感功计算与通信)研究计划,研究内容非常广泛,涉及到计算机系统的所有方面,包括芯片、体系结构、编译器、操作系统、网络通信、实时系统、分布式系统到应用工程等多个技术层次,开发各种相关策略、算法、协议、工具和设备,为系统提供一个完整的功耗解决方案^[2]。日本、英国、韩国、法国、俄罗斯等国家也对计算机系统的功耗问题表现出了极大的兴趣,纷纷展开了该领域的研究工作。

功耗研究先期主要集中在计算机系统的硬件方面,包括工艺级、版图级、门级、RTL 级以及系统结构级的电路低功耗设计和优化策略。随着微电子技术的不断发展,各种底层先进硬件功耗优化技术的出现和应用,使得高层软件方面的功耗管理和优化技术逐步成为控制计算机系统功耗的重要手段,主要包括:

(1) Tiwari 等于 1994 年首先提出了对嵌入式软件进行功耗分析的一些基本概念,建立了基本的指令级功耗模型,并以 Intel 486DX 和 Fujitsu SPARClite 934 处理器为例初步探讨了低功耗编译技术^[3]。随后,许多研究者纷纷开展了各种传统编译优化技术在低功耗方面的改良研究,主要工作集中

① The Green Grid. <http://www.thegreengrid.org>, 2008
 ② Climate Savers Computing Initiative. <http://www.climatesaverscomputing.org>, 2008
 ③ EPEAT (Electronic Product Environmental Assessment Tool). <http://www.epeat.net>, 2008
 ④ Energy-saving benchmark test tool — EECoMark. ECMA (European Computer Manufacturer Association) International. <http://www.ecma.org>, 2008
 ⑤ SPECpower_ssj2008. SPEC(Standard Performance Evaluation Corporation). http://http://www.spec.org/power_ssj2008, 2008

在分支预测、循环结构优化、存储器和 Cache 分配优化等方面,在保持程序语义和遵守目标机器资源限制的条件下,以形成各种功耗优化编译技术^[4].

(2)目前操作系统级的动态功耗管理与优化技术得到了较为普遍的应用,主要包括 Intel、Microsoft 等软/硬件厂商提出的 APM(Advanced Power Management 高级功耗管理)、ACPI(Advanced Configuration and Power Interface,高级配置与功耗接口)等功耗管理规范^①;DVS 技术在运行过程中可动态改变 CPU 的运行频率和工作电压,达到降低系统功耗的目的,如 Intel 公司的 Speed-Step 和 AMD 公司的 PowerNow!等;操作系统功耗相关任务调度模型和算法,能够改善软件任务的动态执行行为,进一步降低系统的功耗^[5].

(3)针对操作系统级的静态功耗优化技术,一些代表性的文献有:Li 等提出了对操作系统采用服务例程级功耗建模的思想,并具体分析了 Linux 操作系统 50 种服务例程的功耗——IPC 关联模型^[6];Tan 等采用二元线性回归方法对 UC/OS II 和 Embedded Linux 两种 RTOS 的功耗实验数据进行了归纳、分析,得出了 RTOS 服务例程级的宏模型,即功耗与软件的算法复杂度、通信量和路径基本块关联信息等高层度量特征之间的函数关系^[7];Baynes 等采用 SimBed 指令级功耗仿真器对 UC/OS、Echidna 和 NOS 3 种 RTOS 的功耗和性能数据进行了实验、度量、分析与比较,揭示了 RTOS 的动态运行行为,对 RTOS 的结构改进提出了一些有价值的建议^[8].

(4)国内在软件功耗优化相关方面的研究工作起步晚于国外,但经过国内一些科研单位同仁多年的刻苦攻关,迄今已取得了一些可喜的成果,一些代表性的工作有:中国科学院计算技术研究所赵荣彩等提出了在多线程体系结构中通过降低处理器执行频率减小系统功耗的理论模型和方法,有效解决了多线程低功耗的编译优化问题^[9];电子科技大学吴琦等提出了当空闲时间长度服从 Pareto 分布时,基于截尾均值法小样本情况下 Pareto 分布形状参数的稳健有效估计算法和基于窗口大小自适应技术非平稳业务请求下的 DPM 控制算法,有效解决了计算机系统非平稳自相似业务条件下自适应动态功耗管理问题^[10];国防科学技术大学易会战等提出了基于语言语法树的实时动态电压调节低功耗算法,使用这种技术,编译器指导的动态电压调节能够有效地降低系统功耗^[11];中国科学技术大学雷霆等将性

能无损的低能耗电压调度问题形式化为一个混合整数规划模型(MILP),提出了基于剖析结果的 PGS 算法和基于分析结果的 ADS 算法,可有效降低软件运行中所需的能耗^[12];在文献[13]中,作者提出了一种基于 Hopfield 神经网络的 SoC-RTOS 软/硬件划分方法,在硬件面积约束条件下优化 SoC-RTOS 的运行功耗,明显地提高了多任务 SoC-RTOS 的运行性能.

除功耗外,一些研究者已开始关注更宽视角计算机系统引起的环境保护问题,并尝试对绿色计算进行了一些初步的研究工作,主要包括:

(1)2007 年 8 月,Wang 在 HDP'07 会议上,对绿色计算中 IT 设备面临的电力需求、发热情况和制冷成本等方面的挑战进行了分析,指出政府和企业应积极采取绿色计算技术等措施应对未来可能出现的难题^[14].

(2)2007 年 11 月,Faludi 在《The Future of Things》杂志上发表了一篇关于绿色计算的文章,从数据中心、计算机部件和计算机整机系统 3 个方面对绿色计算面临的问题和解决措施进行了较完整的诠释^②.

(3)2008 年 10 月,中国科学院计算技术研究所徐志伟研究员在《中国计算机学会周刊》上发表了“为人民计算的三个问题”的文章.他认为,当前主流的微机系统,不论从处理器还是操作系统来看,总体上走的是资源消耗型的模式,如缓存越来越大、占用的芯片面积与寄存体越来越多.因此,为人民计算(computing for the masses)的系统,应该考虑新的模式.更明确地说,我们应该思考并探索下列问题:在个人电脑的未来发展中,是否存在类似北欧国家维持国内生产总值适度增长的同时,保持资源消耗零增长的这样一条可持续发展的道路,使得个人电脑的价值每年适度提高,而资源消耗也能够实现零增长?在近几年的计算机体系结构会议(ISCA)上,我们已经能看到更节能环保的思路,从硬件结构、系统软件和编程语言等几个方面寻求突破^[15].

(4)2009 年 3 月,Francis 和 Richardson 在文章“Green Maturity Model for Virtualization”中,提出在软/硬件架构设计时,“绿色”应作为设计的一个首要目的,专注于全部设备生命周期的能耗,减少现在

① ACPI Specification Revision 3.0b. <http://www.acpi.info>, 2008

② Faludi Jeremy. Green computing update. The future of things. <http://www.tfto.info/articles/1003/green-computing.html>, 2007

和未来的碳排放. 通过不同层次的虚拟化技术, 改善能源效率, 减少能耗, 必然会减少经济成本, 因为能源成本对于一个数据中心的生命周期成本是一个重大的影响因素^①.

低功耗、简单易用是 21 世纪计算机技术发展的主要方向之一, 已成为 IT 业界人士的共识. 推动绿色计算, 降低用户的电费支出, 减少环境破坏, 形成一种可持续发展的模式, 具有重要的社会经济价值和环境意义.

3 绿色计算的重定义

什么是“绿色计算 (Green Computing)”?“绿色计算”具体有哪些研究内容? 早期对绿色计算的研究主要从功耗问题开始, 关于绿色计算完整的研究与分析, 迄今文献还比较少, 目前仍然没有一个公认的定义. 绿色计算之“绿”, 既有自然、生态含义, 更有社会、人文之意, 我们可以从 3 个不同的视角描述绿色计算的含义:

(1) 工业界的视角. 业内不同厂商对绿色计算的概念都有不同的理解, 也采取着不同方式开发自己的产品, 但迄今业界有一个比较认可的说法. 所谓绿色计算, 考虑设备全生命周期内, 即在设计、制造、购买和使用 IT 产品的时候, 除了追求高性能或高性价比之外, 也要考虑电力消耗、空间占用、热耗散、回收利用等因素, 达到节能、环保和节约的要求.

(2) 理论的视角. 与绿色化学与技术、可持续发展的理论和方法进行比较研究^[16], 我们可以采取一种更加统一和抽象的方式定义绿色计算, 即绿色计算是一种以环境为中心的计算模式, 与其它计算模式相融合 (包括高性能计算、可信计算、实时计算、分布式计算、C/S 计算、嵌入式计算、普适计算和云计算等), 从源头上、从根本上改进/消除计算机系统的环境不友好方面, 追求计算机系统与人、社会、资源、环境和经济发展的和谐关系, 避免计算机系统的“过度计算”现象, 即过分追求系统的性能, 实现计算机系统的“绿色”特性 (即环境友好性).

(3) 交叉学科的视角. 绿色计算是一种哲学, 也是一种处理问题的理念和方法, 各种因素相互联系、相互作用、相互影响. 它是计算机科学、环境科学、经济管理科学、材料科学、医学等的交叉学科, 作为一种重要的指导原则, 指导企业设计出有利于经济发展、生态保护和社会增益的计算机系统, 也可以称为可持续计算 (sustainable computing)、环境相关的计

算 (environment-aware computing) 或环境友好的计算 (environment-friendly computing).

进一步地, 对绿色计算的解释如下:

(1) 研究对象. 计算机系统的环境可分为人文环境和自然环境两个部分, 其环境不友好方面, 主要包含人类健康、社区安全、生态环境和能源等方面, 具体表现为能耗、使用者危害 (如计算机职业病、Internet 癖、不良信息侵扰和信息安全等)、废弃物 (如电子垃圾 e-waste)、辐射、资源占用与浪费 (如机房、办公/家居空间、软件/数据的存储空间以及原材料的使用) 等.

(2) 研究内容. 在计算机系统全生命周期内, 包括系统体系结构、软/硬件设计、制造、使用、管理和回收利用等, 采用生命周期评价方法 (Life Cycle Analysis, LCA), 全面考虑对环境的影响.

(3) 研究目标. 采用相应的技术手段和管理措施, 消除计算机系统对环境的不利影响, 实现节能、环保和节约的目的, 而不仅仅只是追求系统功能、速度、智能等目标, 使计算机技术更好地服务于人类社会.

根据上述定义, 我们可以清晰地看出绿色计算与 PAC/C (Power-Aware Computing and Communications, 感功计算与通信) 在研究对象、研究内容和研究目标等方面的区别 (如图 2 所示).

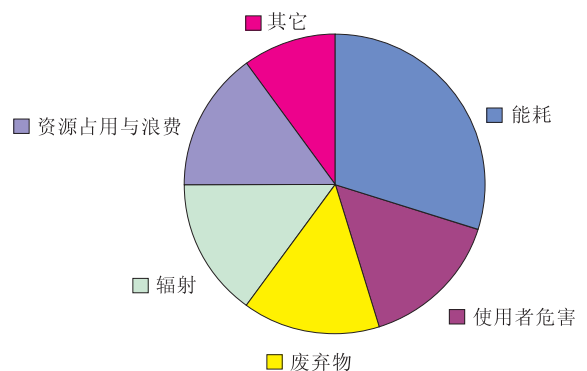


图 2 绿色计算的研究对象

虽然 PAC/C 是绿色计算的重要组成部分, 研究目标主要是节能, 先前许多研究者对计算机系统的能耗问题关注较多, 相关研究成果也较多, 但绿色计算可以视为 PAC/C 的进一步发展, 不但关注计算机系统的能耗问题, 而且还关注使用者危害、废弃物、辐射、资源占用与浪费等问题, 目标是节能、环保

① Francis Kevin, Richardson Peter. Green Maturity Model for Virtualization. Issue 18-Green Computing, The Architecture Journal, <http://www.architecturejournal.net>, 2009

和节约,视角更宽,范围更广,与绿色 IT(Green IT)和绿色电脑(Green Computer/Green Machine)等概念更为接近.

4 绿色计算研究内容的若干探讨

可持续发展强调的是整体系统的改进,而不仅仅是局部过程和步骤的改进^[17].在绿色计算中,最具代表性的方法是生命周期评价方法,做一个“从头到尾”的分析,需要大量的数据和信息,从而评估一个计算机系统或计算过程对人类健康和环境影响的能力.另一种评估方法是框架结构模型,将生态环境、社会和经济性能综合在一起,有效地做出更宏观的战略性决策.

绿色计算的研究内容主要包含下列 4 个部分:

(1) 绿色计算的界限和范围(内涵与外延):主要研究绿色计算判断和评价的标准与方法.

(2) 绿色计算的构成分析:主要研究绿色计算的具体组成因素.

(3) 绿色计算的影响分析:主要研究各具体组成因素对环境的影响.

(4) 绿色计算的改进分析:主要研究绿色计算的具体改进措施.

下面对绿色计算当前需要迫切解决的 3 个主要问题进行初步的探讨,包括:

(1) 绿色计算判断和评价的准则

即如何判断一个计算机系统或计算过程(算法)是“绿色的”?全面评价一个计算机系统或计算过程,不仅需要理论模型与方法的指导,在实际操作中还需要一些量化的指标,准确反映研究体系中某些因素的变化对绿色程度的影响.按照可持续发展的定义,与经济、环境和社会相关的某些因素的量化是非常困难的,甚至几乎是不可能的.

因此,绿色计算的判断标准可以是定性的、定量的或动态的,评价实际上是评价计算机系统或计算过程的环境友好性和可持续性,而环境友好性与可持续性并不是等价的.

(2) 绿色计算的定量评价指标

在工程界有一句名言,“If you can't measure it, you can't improve it(如果你不能度量它,你就不能改进它)”.近年来,绿色化学开始考虑原子经济性,是指反应物中的原子有多少进入了最终产物.通

过与绿色化学的比较研究,对于计算机系统/计算过程与环境和经济相关的一些因素,能够采用定量的方法加以描述,如计算机系统或计算过程(算法)的能耗/成本/质量有多少转化成计算能力.因此,可设计环境系数(E)指标描述绿色计算的某些本质特性, E 可以定义为一个八元组的集合 $E = (q, a, v, p, e, r, l, w)$,其中, q 表示质量因子, a 表示面积因子, v 表示体积因子, p 表示功耗因子, e 表示经济因子, r 表示回收因子, l 表示排放因子, w 表示水耗因子.

八因子的计算方式、单位和含义如表 1 所示(所有数值取小数点后两位),其中:

① 衡量计算机系统能力的 3 个指标:计算能力、通信能力和存储能力,我们优先研究环境系数 E 中计算能力的影响因素,通信能力和存储能力可以采用相同的方法进行研究.

② 在计算能力中,包含计算机系统性能和计算过程能力两部分.计算机系统性能采用 FLOP (Floating-point Operations Per second,每秒浮点运算次数)和 MIPS (Million Instructions Per Second,每秒百万指令数)表示.同时,受限于目前算法复杂度的研究成果,计算过程能力采用运行时间(单位:s,刻画时间复杂度)和存储空间占用(单位:Byte,刻画空间复杂度)表示.

③ 目标产品质量采用单位质量(单位:g)表示.

④ 目标产品面积采用单位面积(单位:cm²)表示.

⑤ 目标产品体积采用单位体积(单位:cm³)表示.

⑥ 目标产品功耗采用单位能耗(单位:W)表示.

⑦ 目标产品购置和运行成本采用单位货币(单位:RMB)表示.

⑧ 目标产品回收成本采用单位货币(单位:RMB)表示,与目标产品购置和运行成本的表示单位相同,但含义和计算方法存在本质区别.

⑨ 目标产品二氧化碳排放量采用单位重量(单位:g)表示,与目标产品质量的表示单位相同,但含义和计算方法存在本质区别.

⑩ 目标产品耗水量采用单位重量(单位:g)表示,与目标产品质量的表示单位相同,但含义和计算方法存在本质区别.

表 1 绿色计算的定量评估指标

环境系数	计算方式	单位	描述
质量因子	质量因子=计算能力/目标产品质量	FLOP/g, MIPS/g, Byte/g 和 s/g	反映单位计算能力的物质利用率
面积因子	面积因子=计算能力/目标产品面积	FLOP/cm ² , MIPS/cm ² , Byte/cm ² 和 s/cm ²	反映单位计算能力的面积利用率
体积因子	体积因子=计算能力/目标产品体积	FLOP/cm ³ , MIPS/cm ³ , Byte/cm ³ 和 s/cm ³	反映单位计算能力的体积利用率
功耗因子	功耗因子=计算能力/目标产品功耗	FLOP/W, MIPS/W, Byte/W 和 s/W	反映单位计算能力的能量利用率
经济因子	经济因子=计算能力/(目标产品购置和运行成本)	FLOP/RMB, MIPS/RMB, Byte/RMB 和 s/RMB	反映单位计算能力的购置和运行经济性
回收因子	回收因子=计算能力/目标产品回收成本	FLOP/RMB, MIPS/RMB, Byte/RMB 和 s/RMB	反映单位计算能力的回收经济性
排放因子	排放因子=计算能力/目标产品二氧化碳排放量	FLOP/g, MIPS/g, Byte/g 和 s/g	反映单位计算能力的二氧化碳排放量
水耗因子	水耗因子=计算能力/目标产品耗水量	FLOP/g, MIPS/g, Byte/g 和 s/g	反映单位计算能力的水耗量

进一步地,在上述环境系数基本因子的基础上,可设计一个更综合的指标“可比功耗因子”,用于全面比较不同类型计算机系统(包括服务器、台式 PC、笔记本和嵌入式计算机)的功耗情况,即

可比功耗因子=(功耗/比频率)×(功耗/面积),其中:

- ① 功耗. 目标产品功耗(单位:W).
- ② 质量. 目标产品质量(单位:g).
- ③ 比频率. 目标产品频率与目标产品质量的比(单位:MHz/g).
- ④ 面积. 目标产品面积(单位:cm²).

另外,“电能有效利用率(Power Usage Effectiveness, PUE)”作为环境系数 E 的一个附加指标,反映计算机系统中计算设施部分、制冷设施部分和供电设施部分的电能使用效率,电能有效利用率的定义如下^[18]:

$$\text{电能有效利用率} = \frac{\text{计算机系统总负载}}{\text{计算设施负载} + \text{制冷设施负载} + \text{供电设施负载}}$$

$$= \text{计算设施负载因子(总为 1.0)} + \text{制冷设施负载因子} + \text{供电设施负载因子}$$

(3) 绿色计算的改进措施

绿色计算的改进措施,是在满足功能和性能需求的前提下,改进计算机系统或计算过程,减少计算时间成本,提高能源和物质的利用效率,实现环境效益的最大化.绿色计算鼓励人们设计计算机系统软/硬件时,充分考虑计算机系统的环境友好性,预防危害的发生,而不仅是采取事后的补救措施.下面给出绿色计算改进措施的 9 条基本准则:

①从源头上,在系统设计时预防问题,而不是在末端治理问题.当开始设计 PC、服务器或嵌入式系统软/硬件时,在追求功能和性能的同时,应充分考

虑绿色计算特性.

②系统或计算过程能耗应最低.绿色计算包含计算机系统级功耗、硬件功耗和软件功耗等技术,如 DPM、DVS 和软件静态低功耗设计技术,降低计算机系统或计算过程运行时产生的能耗,减少全球二氧化碳排放量.

③应避免对人的身心健康产生伤害.设计计算机系统时应考虑使用者身心健康问题,设计符合人体工程学特性的产品,如计算机的外观形状、布局和 I/O 设备设计,应避免使用者长期使用带来的计算机职业病,包括眼疾、手指关节炎、肩肘炎、颈椎炎和腰椎炎等;通过设计相应的过滤和管理软件,避免使用者产生 Internet 癖以及给使用者带来不良信息侵扰等.目前,由于信息技术已经充分融入到生产过程中,其继续提高生产力的作用短期内有限,而采用信息技术的娱乐业却飞速发展,电子玩具和游戏成为工作中消磨时间的重要方式.因此,信息技术一定程度上也在妨碍生产力提高.

④尽量降低系统使用的复杂度,包括功能复杂度和人-机接口的复杂度.目前,计算机系统,尤其是 PC 机,许多软/硬件功能设计过于复杂,同时,升级频繁,这也是 NC(网络计算机)近年来许多公司力求革弊除新、积极尝试推出的一个重要原因.此外,许多软件产品,如微软公司的 Windows 操作系统和 Word 字处理软件,包含的诸多功能普通用户很少、甚至根本用不上,这增加了用户的购买成本、学习成本和微软公司的设计、开发成本,造成了社会资源的浪费.由于软件产品是一种特殊的、无形的产品,这种浪费更不容易引起人们的注意.人-机接口包括 I/O 设备、GUI 界面等,其设计风格和简易程度给产品的使用者带来很大影响,如对于老年人和儿童,电视机的遥控器通常比计算机的键盘更容易掌握,更

加符合人体工程学要求. 因此, 这也是笔输入接口、声控接口、视控接口(如注视、手势、表情等)、脑机接口等新的 NUI(Natural User Interface 用户自然接口)技术近年来蓬勃发展的原因.

⑤尽量采用无毒无害、可再生的材料. 这主要涉及到计算机硬件设计和制造时, 应选用无毒无害、可再生的材料, 避免长期使用时给使用者造成身心伤害, 也避免产品报废时产生电子垃圾.

⑥尽量减少电磁辐射. 计算机系统的内部电路和显示器工作时都将产生一定的电磁辐射, 改进系统设计、电路设计和显示器的材料, 提高电磁屏蔽能力, 都能够有效地减少电磁辐射对人体的伤害以及降低电磁辐射带来的信息泄露风险.

⑦尽量减少系统的重量和体积. 降低软件/数据的存储空间需求, 减少计算机系统的重量和体积, 尤其对可移动的嵌入式系统更具有重要的意义, 不但能够减少面积的占用, 而且增强系统的“可移动性”.

⑧尽量改善系统或计算过程的经济性. 计算机系统的计算能力并不是予取予求的, 它是有代价的, 各种“计算服务”是要收费的, 如软件服务(Software As A Service, SAAS)和网吧提供上网服务收费可视为计算服务收费的一种雏形, 在将来有可能成为计算机行业一种主要的商业模式. 另外, 计算能力的提供与保障, 不但要花费软/硬件资源, 而且需要庞大的人力资源保障.

⑨开发实时监控技术, 避免系统运行时意外伤害的发生. 计算机系统, 尤其是使命关键的系统(mission critical system), 其安全性(security)、危险性(safety)、可靠性(reliability)和容错性(fault-tolerance)等可信性要求非常高, 大力研究和开发相应的软/硬件实时监控技术, 避免系统运行时, 由于软/硬件故障、失效、外界干扰或人员操作失误等原因, 对人、环境和财产造成意外的伤害, 如 1990 年 1 月美国电话系统中断事件、1992 年 11 月伦敦救护车事件、2009 年 6 月法航客机失事事件等事故中软件故障都难逃其咎.

5 结论与未来展望

绿色计算是在建设绿色 GDP 和节约型社会的倡导下提出的, 用绿色科技创造社会价值, 正在成为当今社会的一种共识, 节能、环保和节约已成为整个计算机产业的重要发展趋势, 消费者对健康化和节能化的理念要求也逐渐成为计算机产品更新换代的

新标准.

绿色计算作为一种新的计算模式与技术, 将从前以技术为中心和用户为中心的 IT 产品竞争与设计策略转变为以环境为中心的 IT 产品竞争与设计策略, 是推进化计算机系统可持续发展的重要途径.

通过与绿色化学的比较研究, 我们采取了一种更加统一和抽象的方式定义绿色计算的概念, 并探讨了其主要研究内容, 从而明确了绿色计算的界限和范围, 理顺了相关领域的研究任务和关系, 提出了绿色计算的一些基本思路和一般性方法, 为以后的工作打下了坚实的基础.

希望本文能够起到抛砖引玉的作用. 根据上述绿色计算的基本思路和一般性方法, 研究各种条件下, 绿色计算的具体模型、方法与工具(如功耗因子的度量、评估和改进)是下一步的重要研究任务.

参 考 文 献

- [1] Shen Yan, Guo Bing, Ding Jie-Xiong, Li Xun-Bo. Energy-efficient dynamic task allocation in wireless sensor networks. *Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)*, 2008, 40(4): 76-81(in Chinese)
(沈艳, 郭兵, 丁杰雄, 李迅波. 无线传感器网络节能动态任务分配. *四川大学学报(工学版)*, 2008, 40(4): 76-81)
- [2] Jerraya A A, Yoo S, Verest D, When N et al. *Embedded software for SoC*. Boston: Kluwer Academic Publishers Netherlands, 2003
- [3] Tiwari V, Malik S, Wolfe A. Power analysis of embedded software: A first step towards software power minimization. *IEEE Transactions on VLSI Systems*, 1994, 2(4): 437-445
- [4] Shao Z. High performance, low power and secure embedded systems [Ph. D. dissertation]. School of Engineering and Computer Science, University of Texas at Dallas, Dallas, 2005
- [5] Ravindra Jejurikar, Rajesh Gupta. Energy aware task scheduling with task synchronization for embedded real time systems//*Proceedings of the CASES 2002*. Grenoble, France. New York: IEEE Press, 2002: 164-169
- [6] Li Tao, Lizy Kurian John. Run-time modeling and estimation of operating system power consumption//*Proceeding of the SIGMETRICS'03*. San Diego, CA, USA. New York: IEEE Press, 2003: 160-171
- [7] Tan T K, Raghunathan A, Jha N K. Energy macromodeling of embedded operating systems. *ACM Transactions on Embedded Computing Systems (TECS)*, 2005, 4(1): 231-254
- [8] Baynes K, Collins C, Fiterman E. The performance and energy consumption of embedded real-time operating systems. *IEEE Transactions on Computers*, 2003, 52(11): 1454-1469

- [9] Zhao Rong-Cai, Tang Zhi-Min, Zhang Zhao-Qing, Gao Guang R. A multithreaded compiler optimization technology with low power. *Journal of Software*, 2002, 13(6): 1123-1129(in Chinese)
(赵荣彩, 唐志敏, 张兆庆, Gao Guang R. 低功耗多线程编译优化技术. *软件学报*, 2002, 13(6): 1123-1129)
- [10] Wu Qi, Xiong Guang-Ze. Adaptive dynamic power management for non-stationary self-similar requests. *Journal of Software*, 2005, 16(8): 1499-1505(in Chinese)
(吴琦, 熊光泽. 非平稳自相似业务下动态功耗管理自适应算法. *软件学报*, 2005, 16(8): 1499-1505)
- [11] Yi Hui-Zhan, Chen Juan, Yang Xue-Jun, Liu Zhe. A real-time dynamic voltage scaling algorithm based on syntax tree for low power. *Journal of Software*, 2005, 16(10): 1726-1734(in Chinese)
(易会战, 陈娟, 杨学军, 刘喆. 基于语法树的实时动态电压调节低功耗算法. *软件学报*, 2005, 16(10): 1726-1734)
- [12] Lei Ting, Li Xi, Zhou Xue-Hai. Performance lossless voltage scheduling for low energy software. *Journal of Computer Research and Development*, 2006, 43(6): 1090-1096 (in Chinese)
(雷霆, 李曦, 周学海. 低能耗软件设计中的性能无损电压调度技术研究. *计算机研究与发展*, 2006, 43(6): 1090-1096)
- [13] Guo Bing, Shen Yan, Wang Dian-Hui, Li Zhi-Shu, Chen Xiang-Dong. A power optimization approach to real-time operating systems based on discrete hopfield neural networks. *Chinese Journal of Computers*, 2007, 30(9): 1573-1579(in Chinese)
(郭兵, 沈艳, 王殿辉, 李志蜀, 陈向东. 一种基于离散 Hopfield 神经网络的 RTOS 功耗优化方法. *计算机学报*, 2007, 30(9): 1573-1579)
- [14] Wang David. Meeting green computing challenges//Proceeding of HDP'07. Shanghai, China, 2007: 86-90
- [15] Xu Zhi-Wei. Three problems of computing for the masses. *Communication of CCF*, 2008, 4(10): 10-16(in Chinese)
(徐志伟. 为人民计算的三个问题. *中国计算机学会通讯*, 2008, 4(10): 10-16)
- [16] Shan Yong-Kui. *Assessment Principles for Green Chemistry*. Beijing: China Petrochemical Press, 2006(in Chinese)
(单永奎. *绿色化学的评估准则*. 北京: 中国石化出版社, 2006)
- [17] Lawton G. Powering down the computing infrastructure. *Computer*, 2007, 40(2): 16-19
- [18] Belady Malone C. Metrics to characterize data center & IT equipment energy use//Proceedings of the 2006 Digital Power Forum. Richardson, TX, USA, 2006: 19-24



GUO Bing, born in 1970, Ph. D., professor, Ph. D. supervisor. His current research interests include embedded real-time system, SoC and middleware.

SHEN Yan, born in 1973, Ph. D., associate professor. Her current research interests include distributed measurement systems, embedded system development, wireless sensor networks, and robotics.

SHAO Zi-Li, born in 1972, Ph. D., associate professor. His current research interests include embedded system, hardware/software co-design and compiler.

Background

The work presented in this paper was supported by the National High Technology Development Program (863 Program) of China under grant No. 2008AA01Z105. In this project, the power consumption optimization of embedded systems is based on a Software/Hardware co-design method, and cooperated with Department of Computer Science Laboratory of Embedded systems of The Hong Kong Polytechnic University. In fact, since 2002, the authors have been focusing on the power consumption of embedded systems. So far, a large number of computer systems have been widely used, and play an very important role in the progress of human society development, but "every coin has two sides", it also has brought some clear negative impact on the environment,

and power consumption is one of the main aspects. Meanwhile, illumined by the research of Green Chemistry, we attempt to use a more universal and abstract way to redefine Green Computing, and discuss its main research contents, quantitative indexes and solution.

Recently, a flood of message about financial crisis is full of various kinds of media. However, currently there still exists a more severe problem than financial crisis, i. e., global warming may cause the ecological collapse, and it will endanger exist of human being. So, we think, the global computer science circles should take some actions to deeply research the environmental problems arose from computers, and apply computer technologies into the environmental protection.